

镜筒的机械结构

李 挺

(南京天文仪器厂)

磁场望远镜采用的是有效口径35厘米的折射光学系统，镜筒的机械结构应满足以下要求：

- 1) 具有足够的刚度，在5级风作用下变形量小于 $0.5''$ 。自重变形引入的跟踪误差在1小时内小于 $1''$ 。
- 2) 诸光学元件同轴性偏差小于 $3'$ 。
- 3) 尽可能消除镜筒内的热空气湍流和散射光。
- 4) 考虑到光学元件和机械结构因热膨胀系数不同而引起的误差，并进行相应的补偿。
- 5) 满足各种使用功能的要求。

为满足上述要求，设计中采取了以下措施：

- 1) 镜筒为封闭式的钢结构，前镜筒由两截壁分别厚为5和10mm的无缝钢管焊接而成。后镜筒是壁厚为10mm的铸钢箱体，经计算，其刚度能满足要求。
- 2) 光学元件同轴性要求是由机械加工保证的。
- 3) 在物镜室和准直镜之间有一真空镜筒，使大部分的成像光路，尤其是热量高度集中的主焦点区域处于真空之中，没有产生湍流的条件。主焦点光阑通过 $4' \times 6'$ 的局部太阳区域，97%的不用的太阳光被反射出镜筒，一方面极大地减小成像光路中散射光的来源，同时，避免了过去集中的太阳辐射热进入滤光器和成像系统。此外，由主光阑反射出的太阳光在出射窗窗处形成的光斑有助于对准太阳。
- 4) 设计了温度补偿镜框和焦距温度补偿杆，使在不同环境温度下物镜不发生平移，焦点位置基本上稳定不变。
- 5) 结构设计上保证各种操作转换方便可靠。

按光线经过的次序，镜筒由以下部件组成：物镜室和前镜筒·真空镜筒；准直镜装置；滤光器前置转换装置；双折射滤光器；成像镜装置；电视前置光学系统；滤光器工作温度监视器。具体布局可参阅蓝图(ZJ-02-00)。

一、主镜室的设计

物镜是由K9和ZF2玻璃构成的双分离消色差结构，外径360毫米，重23公斤，如果使用简单的圆柱配合镜框，即使采用较松的配合，例如， 0.1mm ，则在安装时，物镜会由于不大的微斜而卡死在镜框内，导致透镜边缘崩碎。按实际装配经验，工艺间隙不少于 0.3mm ，相当于主焦面上太阳像位移 $22''$ ，这样大的间隙会导致物镜在镜室内移动，从而观测目标在视

场中跳动，或两片透镜相对位移，导致成像的恶化。当然，可在物镜四周塞入薄金属片来减小以至消除间隙，但由于镜室材料的膨胀系数光学玻璃不同，当环境温度降低时，物镜和镜室之间便会出现过盈，在物镜中产生应力双折射，引入为磁场测量不允许存在的仪器偏振，甚至有可能导致透镜碎裂的危险。设镜室是钢的，外径400毫米，在20℃时配合间隙为0，则当环境温度降到-20℃时，则过盈量为0.055mm。则按机械零件设计中过盈配合联接的公式计算透镜受到的应力：

$$\frac{\Delta}{2} = \frac{Pd}{2} \left[\frac{1}{E_1} (1 - \mu_1) + \frac{1}{E_2} \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2 \right) \right] \quad (1)$$

式中 E_1 、 E_2 —玻璃和镜框材料的弹性模量： $E_1 = 0.75 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ ， $E_2 = 2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ ； μ_1 、 μ_2 —玻璃和钢的泊桑系数， $\mu_1 = 0.25$ ， $\mu_2 = 0.26$ ； D 、 d —镜室和透镜的外径； Δ 为直径方向的过盈量；代入(1)式可得 $P = 27.4 \text{ Kg/cm}^2$ ，若取镜室直径为38厘米（壁厚1厘米），则 $P = 15.5 \text{ Kg/cm}^2$ 。可见应力是很大的。

为解决这个问题，按照马克苏托夫提出的补偿镜框的原理，设计了如图1所示的物镜室。它是在铸铁镜框与透镜之间加上铝块作为温度补偿元件，设玻璃，铸铁和铝的热膨胀系数为 α_1 、 α_2 和 α_3 ，透镜外径为 D ，铝块轴向尺寸为 l ，于是，温度补偿条件为：

$$l/D = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2(\alpha_3 - \alpha_2)} \quad (2)$$

取 $\alpha_1 = 7.9D \cdot 10^{-6}$ ，根据实测 $\alpha_2 = 11.5 \cdot 10^{-6}$ ， $\alpha_3 = 25.7 \cdot 10^{-6}$ ， $D = 360 \text{ mm}$ ，代入(2)

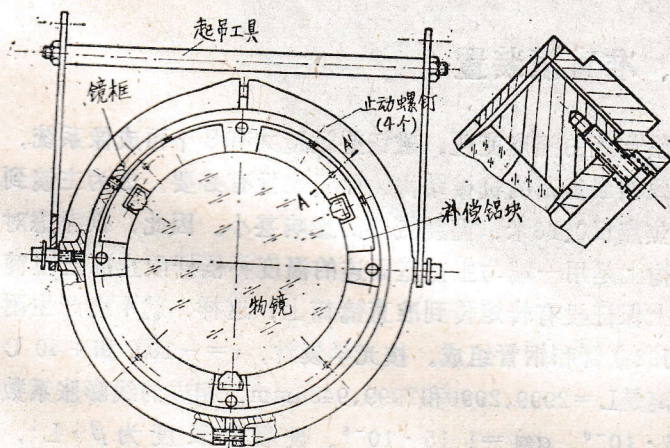


图1 主镜室的结构

式，得 $l = 46 \text{ mm}$ 。在具体结构设计中，采用了4块铝弧段，下面两段的外圆与镜框内圆面紧贴，上面两段留有2mm间隙，四段铝块的内表面是一次装夹加工，与镜框的园柱定位面，从而同镜筒轴线同心，精度达到 $1'$ 之内并不困难。安装时先将上面两弧段取下，便可十分安全地装入物镜并与下面两弧段贴紧，再塞入上面两段，最后轻轻旋动四个止动螺钉，使上段刚刚碰到物镜外缘为止。铝块与镜室间不能用螺钉紧固，否则会导致铝块由于不能自由膨胀而发生变形，因此，每段铝块在轴上祇是用弹簧力压在镜室表面上，可在园周方向上自由膨胀，在半径方向也没有多余约束。

在调试和试观测过程中，这种设计的结构表现出很好的可靠性：在不同环境温度下，用日光灯在物镜前方照亮，可看到两片透镜间形成的干涉条纹，它们始终是规则的同心圆，表明不存在由于过盈引起的畸变，同时，用塞规（最薄0.02）测不出透镜和镜框间有间隙。在实际观测过程中也未发现由于环境温度变化而引起像质恶化或像的跳动。此外，专门设计的起吊工具保证了50公斤的镜室在前镜筒上可靠地安装和拆卸。

在调试和试观测过程中，这种设计的结构表现出很好的可靠性：在不同环境温度下，用日光灯在物镜前方照亮，可看到两片透镜间形成的干涉条纹，它们始终是规则的同心圆，表明不存在由于过盈引起的畸变，同时，用塞规（最薄0.02）测不出透镜和镜框间有间隙。在实际观测过程中也未发现由于环境温度变化而引起像质恶化或像的跳动。此外，专门设计的起吊工具保证了50公斤的镜室在前镜筒上可靠地安装和拆卸。

二、真空镜筒

为消除镜筒内部的热空气湍流，在主镜和准直镜之间安置了一个真空镜筒，它的入射窗

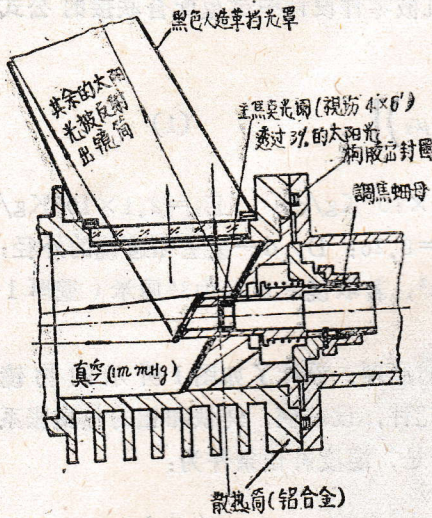


图 2. 主焦点光阑结构 M1:2

和出射窗都是以主焦点 F 为中心的同心球面透镜。各机械连接环节和密封窗支承都使用 O 形密封橡胶圈。用 4 瓩的机械真空泵抽气，3 分钟内可将筒内气压降到 1 毫米汞柱以下，并保持到半个月左右。真空度是用 U 形水银真空计测量并直观地显示。主焦点光阑孔径 $4' \times 6'$ ($3.3 \times 4.9 \text{mm}$)，其正前方是一个倾斜 32° 的金属光阑，其上的孔的投影尺寸稍大于主光阑矩孔，表面抛光镀铝。通过 3% 的太阳光。其余 97% 的太阳光大部分被反射到镜筒之外，小部分被吸收，它转变的热量由散热铝筒向四周扩散。结构设计保证了主光阑可作轴间移动和绕光轴旋转。整个散热筒（即光阑座）可相对于前级真空镜筒在每光轴垂直的平面内移动。从而实现了主光阑的位置和方位角调节。这部分结构如图 2 所示。

三、准直镜装置

准直镜装置设计的主要考虑是补偿焦距的温度变化。磁场望远镜共有 8 个再成像系统，要是每个系统都进行补偿，势必导致相当复杂的机械结构，而且也没有必要。因为主镜到准直镜相距约 3 米，而成像镜到第二焦点仅 0.16 米，温度变化的影响甚小。因此，只考虑对主镜到准直镜的间距进行补偿。在结构上是用一端与主镜室固连的温度补偿杆限止准直镜筒的轴向位置，如图 3 所示，结构上保证没有转矩传到准直镜筒上，这样，就不会产生附加的摩擦力。温度补偿杆由钢（4J32）管和钢管组成。按光学设计， $t = -10^\circ\text{C}$ 和 $+40^\circ\text{C}$ 时，主镜第四面和准直镜第一面的距离是 $L = 2999.2996$ 和 2999.9488mm ，相应的线膨胀系数为 $\alpha_{\text{光}} = 4.328 \cdot 10^{-6}$ ，又： $\alpha_{\text{钢}} = 1.3 \cdot 10^{-6}$ ， $\alpha_{\text{铝}} = 1.15 \cdot 10^{-6}$ 。设钢长度为 $\beta \cdot L^1$ ，则：

$$\alpha_{\text{钢}} (1 - \beta) + \beta \alpha_{\text{铝}} = \alpha_{\text{光}} \quad \text{得 } \beta = \frac{\alpha_{\text{钢}} - \alpha_{\text{光}}}{\alpha_{\text{钢}} - \alpha_{\text{铝}}} = 0.703,$$

于是，当连接距离 $L^1 = 3040$ 时，钢管管长 2137mm。在钢管管下端还有一对螺母，可用来调节准直镜筒的轴向距离。

准直镜后面还有一个二维旋转支架，支架框内可安置必要的光学元件，如定标用玻璃平板或波片等，它可相对于光轴倾斜，还可绕光轴转动，以提供必要的人工仪器偏振。旋转支架可在燕尾槽座内插入或抽出。

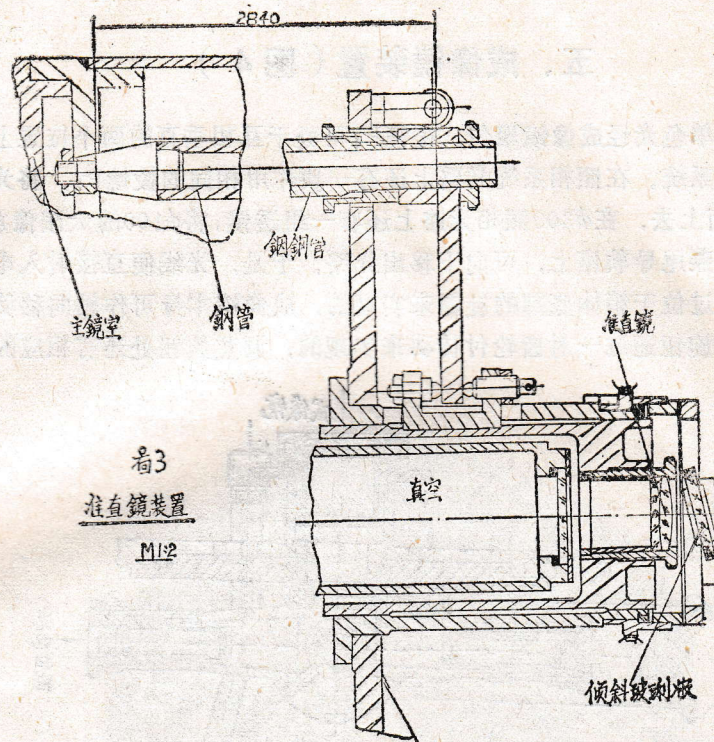


图3 准直镜装置

四、双折射滤光器

双折射滤光器（机械结构另文介绍）及其前置转换装置是作为一个整体装在铝座上的，后者前后端有两个座孔与滤光器外园配合，保证轴向准直。铝座与镜筒后箱体用螺钉连接，锥销定位。座孔同箱体的配合孔一次加工，保证同心。滤光器前方有一个三层导轨座，第一层是两块干涉滤光片（ 4861\AA 和 5324\AA ），手动转换。第二层是两块定标片，由偏振片和后随 45° 取向的 $\frac{1}{4}$ 波片（ 4861\AA 及 5324\AA ）组成。第三层是两块光轴垂直和 45° 的消色差 $\frac{1}{4}$ 波片。后两层都有一个空档位置，并由电机带动，用镜筒前面板上的两个波段开关（三位置）实现转换。滤光器上方有一温度监视望远镜，固定在箱体的上盖板的底面上，其目镜头安置在箱体前面板的上方。滤光器（重33公斤）是用专门设计的起吊装置装入望远镜或取出，相当安全可靠。

滤光器四个波片转动通过正交螺旋齿轮付，万向联轴节通到位于箱体左侧的传动指示箱内，每个旋钮有两个度盘，粗读度盘一周对应波片转 360° ，精读度盘一周对应波片转动 45° ，格值对应波片转角 0.2° 。这种手动调节比较麻烦，每次调透过带要转动4个旋钮，还要看度盘，因此，转换很不方便，速度慢。随着计算机技术发展，现已将传动指示箱改为步进电机驱动。每个波片的转动是由一只步进电机（步距角 $1.5^\circ/3^\circ$ ）通过一对蜗轮付驱动的。便可实现微机控制的透过带位置调节。

五、成像镜装置(图4)

从滤光器出射的单色光经成像镜聚焦,棱镜 P_1 可处于互相垂直的两个位置上,将光线反射到照相或光电扫描系统。在照相系统光路上还有一块作用相同的棱镜 P_2 ,将光线反射到 $\phi 100$ 或 $\phi 300$ 照相焦面上去,在 $\phi 300$ 照相光路上还有一组透镜,将 $\phi 100$ 的太阳像放大三倍。 P_1 棱镜及其转座安置在燕尾导轨座上,可向下移出光路,于是,光线便直接射入电视成像系统。以上转换都是通过位于箱体底部的旋钮来实现的。成像镜本身可作轴向移动,是由箱体前面板右下方的调焦旋钮通过一对齿轮付传动来实现的,调焦旋钮处还有相应的度盘显示。

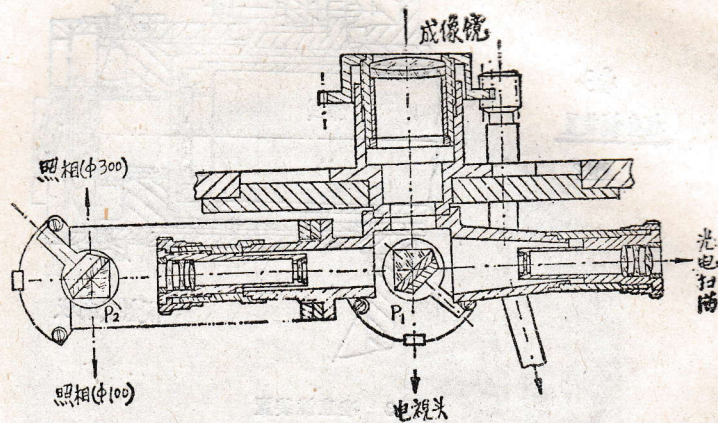


图4 成象镜装置

六、电视前置光学系统

在电视摄像管前有两套光学装置,一是放大透镜组,另一是测试卡投影装置。前者包括5组不同倍率的透镜组,放大率为0.5, 1, 2, 3, 4。可在摄像管靶面上提供5种比例尺不同的太阳像,可适应将来新的探测器之应用。面板前有一个旋钮,通过锥齿轮付传动,使五组透镜分别进入光路,同时,在面板右上方有一圆窗孔,可看到相应的太阳直径的数值。

测试卡镜筒位于箱体前面板正上方,前端是一电视测试用的图案,通过直角棱镜向下反射,和10:1透镜组缩小,再经 45° 反射到摄像管靶面上。在面板中部有一杠杆,扳动它可使缩小透镜连同反射镜一起进入或移出光路。在缩小透镜和反射棱镜之间可插入一块QB22滤光片,其透过峰在 5324A° 附近。

七、镜筒刚度计算

1. 自重变形

图5示出简化的镜筒前部结构及受力情况,要计算的是纬轴前方镜筒结构的变形引起物镜中心的位移量。纬轴后方的箱体部分结构复杂,很难作简化计算。但考虑到:①箱体截面

惯矩大(近1倍);②纬轴后部比前部短(约为 $\frac{2}{3}$)。可近似地认为它的变形是前部的

$$\left(\frac{J_2}{J_3}\right) \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 = 0.25 \text{倍。}$$

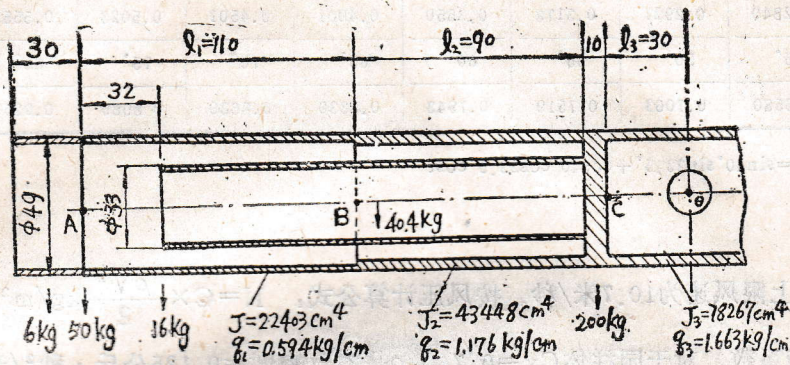


图5 镜筒的简化结构

由于主焦点是经过三次成像后落到最终电视靶面上的,最终焦点移动方向与它相反,因此,这两种变形应当是叠加的。

计算前部变形时,是将镜筒当作以纬轴为端部的不等截面悬臂梁,采用熟知的材料力学中的变形公式:

$$\text{集中载荷 } y_1 = pl^3/3EJ, \quad \theta_1 = Pl^2/2EJ$$

$$\text{力矩 } y_2 = Ml^2/2EJ, \quad \theta_2 = Ml/EJ$$

$$\text{分布载荷 } y_3 = ql^4/8EJ, \quad \theta_3 = ql^3/6EJ$$

①A相对B的挠度: $y_1 = 5.55\mu, y_2 = 0.12\mu, y_3 = 2.43\mu$ 。

②B相对C的挠度: $y_1 = 3.39\mu, y_2 = 4.59\mu, y_3 = 1.11\mu$ 。

③C相对D的挠度: $y_1 = 0.28\mu, y_2 = 1.02\mu, y_3 = 0.01\mu$ 。

④B点转角 $\theta = 1.75 \cdot 10^{-6}$, 引入A点位移: $y_4 = 19.25\mu$ 。

⑤C点转角 $\theta = 8.23 \cdot 10^{-6}$, 引入A点位移: $y_4 = 17.28\mu$ 。

最后得A点的总位移量 $Y = \sum y_i = 55.03\mu$, 这引起主焦点处太阳像相同数量的位移, 对应的角位移为 $\frac{55.03 \cdot 10^{-3}}{2800} \cdot 206265 = 4.05''$ 。

又A点相对于B点的转角 $\theta = 10.72 \cdot 10^{-6}$, 于是总的A点转角为 $\theta = 3.65 \cdot 10^{-5} = 7.5''$, 对像质不会有什么影响。计入箱体变形, 可认为最大的重力变形为 $5.5''$ 。

由于采用了光电导行, 设光电导行镜跟踪是准确的, 便可假定上述变形是相对于光电导行镜的变形, 需考虑这个变形对跟踪的影响, 为此, 可求出 $\rho \cdot \sin z$ 随时间变化的最大值,

即求 $\frac{d \sin z}{dt}$ 的最大值。由于用解析式求解相当复杂, 用数值计算法较容易。对 $\delta = 0^\circ, +23^\circ.5$

和 $-23^\circ.5$ 三种情况的计算表明, 当 $\delta = 23^\circ.5$ 时, $\sin z$ 的值较大, 于是就 $\delta = 23^\circ.5$ 进行计算, 结果见表1。可以看出由 30° 到 35° , $\sin z$ 的变率最大。由 25° 到 40° , 即在1小时内 $\sin z$ 的变

化为0.1573, $\rho \cdot \sin z$ 的变化为0".87, 小于1", 是在允差范围之内的。

表1. $\delta=23.5^\circ$ 时 $\sin z$ 随时角 t 的变化

t	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
Sinz	0.2840	0.2927	0.3178	0.3550	0.4001	0.4501	0.5023	0.5551	0.6073
t	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°
Sinz	0.6580	0.7063	0.7519	0.7943	0.8330	0.8680	0.8989	0.9257	0.9482

$$\sin z = \sin 40^\circ \sin 23.5^\circ + \cos 40^\circ \cos 23.5^\circ \cos t$$

2. 风荷变形

五级风的上限风速为10.7米/秒。按风压计算公式: $N = C_x \times \frac{\rho V^2}{2} \text{kg/m}^2$

式中 C_x 是风荷系数, 对于圆柱体 $C_x=0.74$ 。 ρ 是空气密度 $=0.125$ 公斤·秒²/米⁴· V 为风速。在计算风荷变形时, 主要考虑前镜筒, 可认为箱体部分被基座挡住而不受风荷。此时,

单位长度上的风荷 $g = 0.74 \cdot \frac{0.125}{2} \cdot 10.7^2 \cdot 0.49 \cdot 10^{-2} = 0.026 \text{kg/cm}$, 与计算自重变

形相似, 有:

①A相对于B的挠度 $y_3 = 0.20\mu$

②B相对于C的挠度 $y_1 + y_2 + y_3 = 0.25\mu$

③B点转角引入A点挠度 $y_4 = 0.52\mu$

④C点相对D的挠度 $y_1 + y_2 = 0.02\mu$

⑤C点转角引入A点挠度 $y_4 = 0.34\mu$

物镜中心, 亦即主焦点处像的总位移 $Y = 1.33\mu$, 相当于角位移 $\delta = 0.1'' \ll 0.5''$, 因此, 镜筒对于风荷有足够的刚度。

八、与其它部件的关系

箱体右后侧同光电扫描器的大底板用螺钉固连。箱体左上角安置光电导行镜, 右下角是目视导行镜。光电导行镜是安置在一个小的叉式基座上, 可相对镜筒作两个方面的运动。目视导行镜外表有两个圆柱配合面, 塞入两个轴承座内, 后者的座孔是与箱体配合孔一次加工的, 从而保证目视导行镜与主镜筒的轴线相互平行。两个镜筒均有罩壳保护。为使镜筒关于纬轴平衡, 在箱体上方, 纬轴之前, 安装了八块铅块, 每块重10公斤。因此, 将这些平衡重去掉, 可安置轻重量的其它用途的镜筒。

THE TUBE CONSTRUCTION OF THE 35cm SOLAR MAGNETIC FIELD TELESCOPE

Li Ting

(Nanjing Astronomical Instrument Factory)

The imaging system of the 35cm solar telescope—magnetograph is a refractive one. The mechanical construction of the tube which contains all the imaging optical parts and the birefringent filter must satisfy the following requirements:

- 1). Enough rigidity: The image shift under force 5 wind must be less than 0.5", and the tracking error due to its self weight less than 1"/hour.
- 2). Render the thermal turbulence and stray light minimal.
- 3). Compensating the possible optical errors caused by the difference of the thermal coefficients between the optical elements and the mechanical construction.
- 4). The coaxial errors between the imaging parts must be less than 3'.
- 5). Other common requirements for the tube function.

So the tube with a length of about 4.5m and cross section size of about 50cm was designed as a steel construction. There is a vacuum tube including the seriously heated focus diaphragm between the objective and the collimator lens, and the 4x5' focus diaphragm reflects about 97% unused sunlight out of the tube. The objective cell was designed as a thermal compensating construction, and the collimator lens was linked with the objective through a rod consists of invar and steel tubes.

The design considerations and the necessary calculation for satisfying the above-mentioned requirements are given in detail in this paper.